



# LIIMARISTIKON SORMILIITOKSEN JYRSIN- NÄN OPTIMOINTI

Juuso Aro

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2016  
Rakennustekniikan ko.  
Talonrakennustekniikka



# TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikka  
Talonstrakennustekniikka

ARO JUUSO:

Liimaristikonsormiliitoksen jysynnän optimointi

Opinnäytetyö 41 sivua, joista liitteitä 2 sivua  
Toukokuu 2016

---

Liimaristikko on uusi tulevaisuuden tuote rakennusmarkkinoilla. Sen on keksinyt ja kehittänyt tekniikan tohtori Tuomo Poutanen, jolla on pitkä historia puurakenteiden kehitystyössä. Liimaristikossa käytetään liitostekniikassa hyväksi ainoastaan liimattuja sormiliitoksia. Liimattu sormiliitos on ensimmäinen puuliitos, joka ottaa vastaan tehokkaasti momenttikuormia. Momenttijäykkä liitos on mahdollistanut kevyempien, edullisempien, monimuotoisempien, mutta samalla kestävämpien ristikkorakenteiden luomisen.

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin sormiliitoksen jysynnän optimointia. Optimointia suoritettiin kolmelle erilaiselle jysyntätapaukselle, joissa esiintyvät liitokselle tyypilliset ja yleisimmät ongelmat. Tapausten tutkimuksilla oli tavoitteena luoda ensimmäiset versiot jysynnän liikeradoista, joissa koko liitoksen jysyntä pystytään tuottamaan yhdellä jysyntäkerralla. Työssä ongelmia tutkittiin määrätyillä dimensioilla, mutta virheet muodostuvat samojen periaatteiden mukaan, vaikka liitoksen mittasuhteet muuttuisivat. Ongelmat pyrittiin ratkaisemaan käyttämällä teoreettista 3D-mallintamista, jossa liitosta ja sen variaatioita oli mahdollista muunnella. Tutkimuksissa pyrittiin löytämään jysyntämalli, joka luo yhdellä jysyntäkerralla mahdollisimman virheettömän liitoksen.

Liikeratojen tuloksiksi saatiin pääosin onnistuneita ratkaisuja, kun kahdessa tapauksessa kolmesta onnistuttiin pysymään annettujen raja-arvojen puitteissa. Työn todellinen hyöty kuitenkin realisoituu vasta tulevissa liitosmalleissa. Liitoslujuuden, liitoskulmien ja erilaisten kursojen vakiintuessa, saadaan tämän työn tuloksilla kohdennettua tulevien liike-ratojen suunnittelua oikeaa suuntaan heti alusta.

Työ suoritettiin osana Tuomo Poutasen liimaristikoiden kehitystyötä. Tässä opinnäytetyössä kuvatut prosessit ovat luottamuksellisia. Luottamuksellinen aineisto on poistettu julkisesta raportista.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Construction Engineering  
Building Construction

**ARO JUUSO:**  
Milling Optimization for Glued Finger Joints

Bachelor's thesis 41 pages, appendices 2 pages  
May 2016

---

Dr. Tuomo Poutanen has invented glued timber truss where only glued finger joints are used. Poutanen claims that many wooden beams and trusses as well as steel and concrete structures can be replaced with finger joint trusses. A glued finger joint is visually good-looking and it is the first wooden joint that carries moment load, enabling more geometric and structural options.

In this study, development work for milling process has been processed. The main goal of this study was to find a new course for the milling tool which produces least error. There were three cases where the typical problems of the finger joint occurred. Joints in all three cases were 3D modeled and theoretically tried to solve. The machining fault is minor so it can be justified to investigate these problems only theoretically.

This study is part of the development work for finger joints. Used processes were confidential. All confidential parts are removed from the public version.

---

Key words: glued truss, glued finger joint, milling process

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	LÄHTÖKOHDAT.....	6
2.1	Erot tavanomaisiin ristikoihin.....	6
2.2	Materiaali menekkien vertailu .....	7
2.3	Työssä käytettävät geometriat.....	8
2.4	Tavoitteet ja virhemarginaalit .....	11
2.5	Käytössäolevat tutkimustavat .....	12
3	TUTKIMUSTULOKSET .....	13
3.1	Yleistä .....	13
3.2	Tapaus 1, Aksiaaliliike paarteessa .....	13
3.2.1	Tapauksen kuvaus .....	13
3.2.2	Tapauksen tulokset.....	15
3.2.3	Tapauksen yhteenveto.....	21
3.3	Tapaus 2, Aksiaaliliike diagonaalissa .....	22
3.3.1	Tapauksen kuvaus .....	22
3.3.2	Tapauksen tulokset.....	23
3.3.3	Tapauksen yhteenveto.....	28
3.4	Tapaus 3, Aksiaaliliike paarteessa sekä diagonaalissa .....	29
3.4.1	Tapauksen kuvaus .....	29
3.4.2	Tapauksen tulokset.....	30
3.4.3	Tapauksen yhteenveto.....	34
3.5	Tapaus 4.....	35
4	TULOSTEN ARVIOINTI.....	36
4.1	Eri jyrshintapausten vertailu tuotannon kannalta.....	36
4.2	Virheiden keskinäinen vertailu .....	37
5	POHDINTA.....	38
	LÄHTEET.....	39
	LIITTEET .....	40
	Liite 1. AutoCAD -mallit .....	40
	Liite 2. 3D-tulostettu malli .....	41

## 1 JOHDANTO

Ristikkorakenteiden historiassa on pitkään ollut tavanomaisimpana rakenteena naulalevyristikot. Kuitenkin TkT Tuomo Poutasen kehittämällä kaikissa kulmaliitoksissa toimivalla sormiliitoksella on mahdollisuus päästä selkeisiin etuihin verrattuna naulalevyristikoihin. Poutasen sormiliitos mahdollistaa sen, että niin puiset massiivipalkit, NR-ristikot ja jopa teräs- ja betonirakenteet voitaisiin korvata sormiliitosta hyödyntävällä ristikolla. Sen etuihin kuuluu niin liitoslujuuden, liitosjäykkyuden kuin palonkestävyydenkin ominaisuudet, sekä se on ensimmäinen puuliitos, joka ottaa vastaan tehokkaasti momenttikuormia.

Tässä työssä on selvitetty, miten tuotannossa olisi mahdollista kehittää jyrinnän erilaisia liikeratoja. Liikeradat ja sormiliitokset on mallinnettu sormitasolle ja niissä syntyviä eroja on tutkittu. Tutkimuksessa on huomioitu materiaali tarvetta ja menekkiä sekä jyrinnästä aiheutuvaa virhettä. Työssä mallintamiseen on käytetty AutoCAD ohjelmaa.

Työn teoriaosuudessa on käsitelty sormiliitosten historiaa sekä yleisiä eroavaisuuksia enemmän käytössä oleviin ristikoihin. Samassa osiossa on myös selvitetty käytössä olevat geometriat sekä rajattu työn tavoitteet. Tutkimustuloksissa on esiteltynä selkeästi kaikki tutkittavat tapaukset sekä niissä olevat eroavaisuudet ja erilaiset lopputulokset. Tulosten arvioinnissa on käsitelty eri jyrshintapojen vertailua, niiden virheiden vertailua sekä menekkien vertailua.

## 2 LÄHTÖKOHDAT

### 2.1 Erot tavanomaisiin ristikoihin

Tavanomaisesti on ristikoissa totuttu käyttämään liitoksissa naulalevyä. Naulalevyn negatiivisia puolia on mm. heikko palonkestävyys, käyttökelvottomuus ulko- sekä kosteissa tiloissa. Naulalevyt heikentävät puun visuaalisia ominaisuuksia ja ovat kohtalaisen kalliita valmistaa. Nämä kaikki heikkoudet pystytään poistamaan ja lisäksi lujuusominaisuuksia pystytään parantamaan vaihtamalla liitos liimattuun sormiliitokseen. (Poutanen 2016.)

Kustannus erot tavanomaisiin NR-ristikoihin tulevat esille suurimmaksi osin siinä, että liima on halpaa. Se on noin 90 % edullisempaa kuin naulalevyn kustannus per liitos. Tämän pääsyyn myötä liimaristikon kokonaiskustannus on noin 15-40 % pienempi kuin NR-ristikolla. Samalla liimaliitoksella saavutetaan myös lujempi liitos, joka mahdollistaa saman kestävyuden vaikka vetosauvan koko pudotettaisiin puoleen. Liimaristikon työkuukustannuksia puolestaan tiputtaa jo pelkästään se, että liimaristikossa on noin 60 % vähemmän työstettäviä kappaleita ja kaikki osat ovat samaa materiaalia. (Poutanen 2016.)

Sormiliimaristikko on yleispätevä, sillä voidaan valmistaa kaikki ristikkotyypit, jotka nyt valmistetaan naulalevyillä. Lisäksi on mahdollista valmistaa sellaisia rakenteita, joita naulalevyteknologialla ei pystytä. Kolme syytä miksi sormiliimatekniikalla on laajemmat mahdollisuudet ovat:

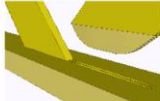




- Täysin jäykkä liitos
- liitettävien puiden ei tarvitse olla saman paksuisia
- puut voivat olla paksuudeltaan millaisia tahansa.

Naulalevyristikoissa liitokset ovat puolijäykkiä kun taas liimaliitoksissa ne ovat täysin jäykkiä. Näin ollen liimatussa ristikossa ei tarvita yleensä ollenkaan diagonaaleissa nurjahdustukia. Muita suuria eroja ovat mm., että liimaristikolla voidaan tehdä paarteisiin mutkia, siinä voidaan jättää suuri aukko ristikon keskialueelle, bumerangi-palkkien valmistus mahdollistuu, käyttö kosteissa tiloissa on mahdollista jne. (Poutanen 2016.)

## 2.2 Materiaali menekkien vertailu

Puun liimaus on kehittynyt, joka on kasvattanut luotettavuutta ja laskenut kustannuksia. Parantuneita ominaisuuksia on määrän puun liimauksen ja ristiinliimauksen mahdollistuminen, liimojen kovettumisaikojen lyhentyminen, liimat ovat nykyään täyttäviä ja toimivat vaikka liimapinnoissa olisi rakoja sekä liimapuristukseen vaaditut paineet ovat pienentyneet jopa kymmenenteen osaan.

Suurimmat materiaaliedut liimaristikko saavuttaa sillä, että sen liitokset ovat täysin momenttijäykkiä, jolloin rasitukset jakautuvat edullisemmin ristikolle. Tämä mahdollistaa yleensä paksuudeltaan noin puolet pienempien diagonaalien käytön. Liimatussa ristikossa puutavara voi olla höyläämätöntä, sillä puuosat jyrksitään aina tarkkoihin mittoihin. Katkomisesta aiheutuvaa hävikkiä ei myöskään synny sillä samalla liitosperiaatteella voidaan jatkaa lyhyet kappaleet uudelleen käytettäväksi. Puumenekin pienentymisen mahdollisuus ei pelkästään laske materiaalikuluja vaan se myös pienentää taipumaa parhaimmassa tapauksessa jopa 20 %. Tapauksessa, jossa taipuma tulee mitoittavaksi, 20 % pienempi taipuma saadaan aikaan liitoksen siirtymättömyydellä, joka on NR-ristikoissa kohtalainen ja sitä pitää kompensoida lisäämällä materiaalia. (Poutanen 2016.)

	<b>The glued timber truss</b>	<b>I-beam</b>	<b>Metal web beam</b>	<b>Nail plated timber truss</b>	<b>Glue lam beam</b>
					
Material	2.5	2.7	4.0	4.0	4.2
Manufacuring	1.0	0.8	2.0	2.5	0.8
Overhead costs	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
<b>Factory price</b>	<b>5.0</b>	<b>5.0</b>	<b>7.5</b>	<b>8.0</b>	<b>6.5</b>
Perforation	-	0.7	-	-	0.7
Support	-	0.5	-	-	0.4
Cross bracing	-	0.4	0.2	0.2	0.4
<b>Reference price</b>	<b>5.0</b>	<b>6.2</b>	<b>7.7</b>	<b>8.2</b>	<b>8.0</b>
<b>Cost advantage of the new truss</b>	<b>-</b>	<b>20 %</b>	<b>35 %</b>	<b>39 %</b>	<b>38 %</b>

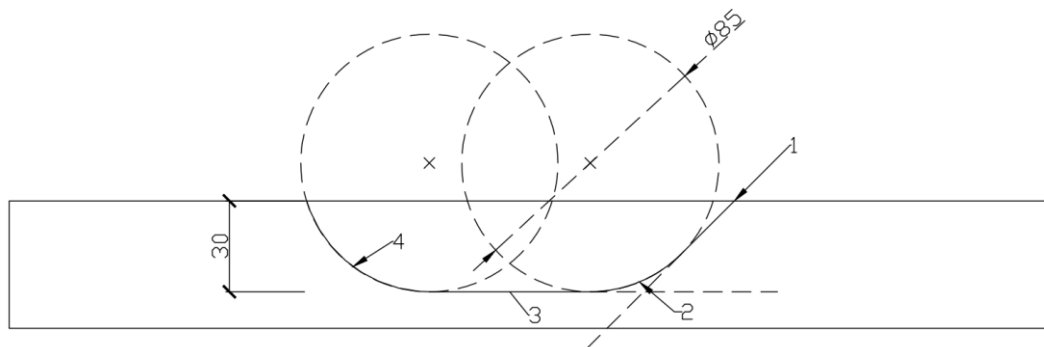
KUVA 1. Kustannushyötyjä kilpailijoihin verrattuna (Poutanen 2016)

### 2.3 Työssä käytettävät geometriat

Tässä työssä tutkituissa tapauksissa käytössä olleet päämitat ovat olleet seuraavia:

- Parre 42\*98mm
- diagonaali 8\*100mm
- kurson ulkohalkaisija 85mm ja sydänhalkaisija 25mm
- kurson kärki 1,5mm ja tyvi 5,5mm
- diagonaalin asennuskulma 45°.

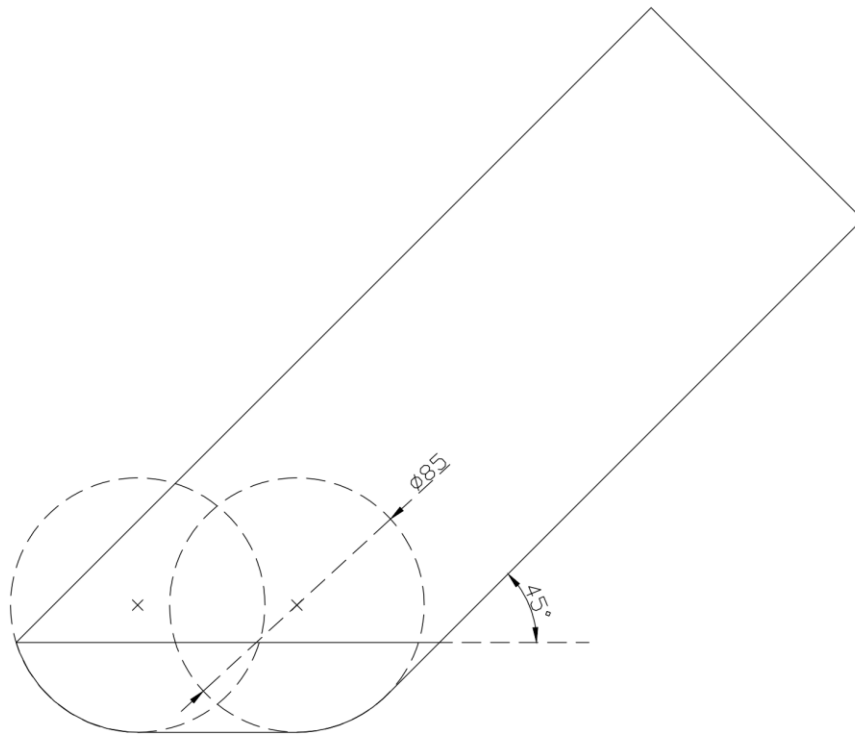
Näillä lähtöarvoilla on saatu paarteeseen tulevan uran tarkat koordinaatit. Parre jyrskittää kurson täyteen syvyyteen, jolloin uran syvyydeksi muodostuu 30mm. Diagonaalin kulman ollessa 45° tulee uran ensimmäiseksi osaksi suora 1 (kuva 2). Tulokulman ollessa 45° ja maksimi syvyyden ollessa 30mm saadaan paarteessa olevalle kaarelle kaksi tangenttia. Näitä tangenteja ja keskipistettä hyväksikäyttäen saadaan ensimmäinen kaari kuvassa 2.2. Tämän jälkeen tulee suora kuvassa 2.3, jonka lähtöpiste on kaari 2 ja loppupiste kaari 4. Kaari 4 syntyy diagonaalin leveyden ja jyrskintä syvyyden perusteella.



KUVA 2. Paarteen yleiset geometriat

Diagonaalin dimensiot syntyvät automaattisesti, kun paarteen ura on ratkaistu. Ideaalitalanteessa paarteen ura ja diagonaalin sormi noudattavat täsmälleen samanlaista geometriaa. Kuvassa 3 diagonaalin yleiset geometriat on esiteltynä samat kurson muodostamat ympyrät kuin kuvassa 2. Ne määrittävät tärkeimmät ominaisuudet liitokselle.





KUVA 3. Diagonaalin yleiset geometriat

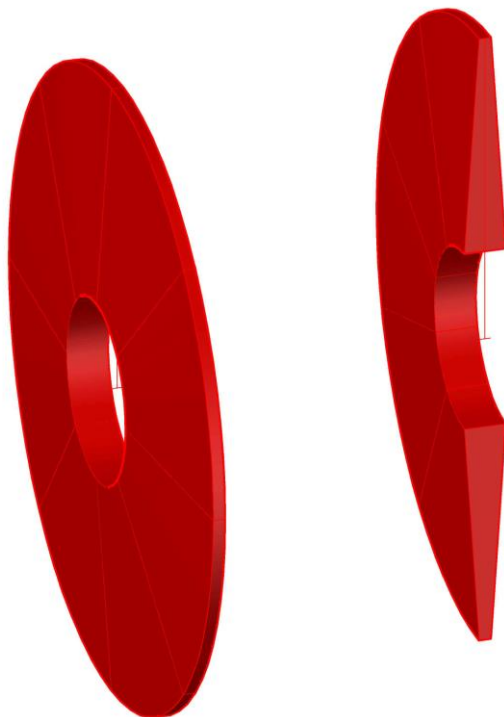
Tällaisella yleispätevällä liitoksella saadaan aikaan sellaiset kappaleet, jotka on mahdollista jyrsiä niin, ettei jyrsin syö kappaleisiin koloja tai aukkoja. Kolot ja aukot keräävät likaa ja mahdollistavat paikkoja, joihin kosteus voi jäädä pidemmäksi aikaa seisomaan, aiheuttaen liitokselle mahdollisesti materiaalin heikentymistä. Kaikki työssä tutkitut tapaukset käyttävät näitä geometriatietoja, eri tapauksissa niille annetaan lisäksi eri z-akseli arvoja, jotka luovat tutkittavat erot.

Käytettävissä oleva jyrsimen kurso on monileikkeinen, joista jokainen leike syö kärjestä 1,5mm ja kannasta 5.5mm. Kurson sydänhalkaisija on 25mm ja ulkohalkaisija 85mm, näin ollen jää kursolle jyrsintä syvyydeksi 30mm. Kurso on aina tutkituissa tapauksissa jäykästi kiinni jyrsimessä ja jyrsintä tapahtuu kohtisuoraan puuta vasten. (Poutanen 2016.)



KUVA 4. Käyttettävä kurso

Kurson pyöriessä yli 7000 kierrosta minuutissa, oletetaan kurson jyrsvän sille suunnitellussa liikeradassa aina joka kohdassa täyden kierroksen muodostavan jrsintäalueen. Tässä työssä mallinnuksessa käytettävän kurson jrsintäalue on esitelty kuvassa 5 Kurson yhden leikkeen muodostama jrsintäalue. (Hintsala 2011, 17)



KUVA 5. Kurson yhden leikkeen muodostama jrsintäalue

## 2.4 Tavoitteet ja virhemarginaalit

Tässä työssä tutkimuksilla on tavoitteena selvittää kursolle sellainen liikerata, jolla tarvittavat jysinnät voidaan suorittaa yhdellä liikkeellä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että jysin on liikuttava kolmen akselin suuntaisesti samaan aikaan. Tähän asti jysintä on suoritettu niin, että jysin liikkuu vain 2-akselin suuntaisesti ja jysintöjä on tarvinnut suorittaa useampia saavuttaakseen saman lopputuloksen.

Tutkimuksessa on valittu kolme erilaista jysintätapaa, joille kaikille on tavoitteena löytää optimaalisin liikerata. Saaduista liikeradoista tarkastellaan syntyvät virheet ja liikeratoja verrataan toisiinsa, näin pyritään löytämään kaikkein optimaalisin tapa tuottaa toimiva liitos.

Tutkimusten epätarkkuuteen vaikuttavat käytettävän ohjelman AutoCAD:n mallinnustarkkuus. Tutkittujen liikeratojen luomat jysinnät on suoritettu niin, että annetulle liikeradalle annettu kappalemäärällisesti tutkittavia pisteitä. Näin ollen jysintä ei ole mallinnuksessa jatkuva vaan aiheuttaa malliin pykäliä, jotka todellisuudessa olisivat suoria. Kuitenkin pisteitä on valittu jokaiseen jysittävään liikerataan vähintään 200 kappaletta, tämä luo tarkkuuden joka on vähintään 0,02mm. Poikkeuksena kuitenkin tapaukset, joissa aksiaaliheilautuksia on diagonaalissa, näissä tapauksissa pisteitä on jouduttu vähentämään mallin raskauden takia.

Jysintäteknologian luomia todellisia virheitä syntyy pääasiallisesti kurson jäykästä kiinnityksestä jysimeen. Näin ollen kaarevien linjojen tekemiseen sisältyy aina jysintävirhettä kurson ollessa aina kohtisuoraan puuta vasten.

Virheille on määrätty tavoite raja-arvoksi 0,5mm, pienimuotoisesti arvo voidaan ylittää. Nykyiset liimat ovat täyttäviä, joten lujuushäviötä ei tule, vaikka tämä raja-arvo hieman ylitettäisiin, mutta liima menekki kasvaa huomattavasti. Liiman menekin kasvu tuottaa turhia kustannuksia.(Poutanen 2016.)

## 2.5 Käytössäolevat tutkimustavat

Tässä työssä optimaalisen liikeradan löytämiseen käytettiin vain 3d-mallintamista. Mallinnus suoritettiin AutoCAD –ohjelmalla, jolla kaikki tapaukset mallinnettiin sormitalle. Jyrsimen liikerata on kuvattu kaikissa tapauksissa niin, että havainnekuvissa oleva liikerata on kurson keskipisteen liikerata.

Tutkimukset ovat siis täysin teoreettisia ja niissä ei oteta huomioon jysinnässä syntyvää jyrsimen virhettä. Toisaalta nykyisille CNC -laitteille valmistajien antamat virheet ovat kokoluokaltaan, mekaaninen tarkkuus 0,000187mm ja toistuvien operaatioiden virhe 0,03mm. Tällöin voidaan olettaa, että näiltä osin työssä tehdyt havainnot vastaavat riittävällä tarkkuudella todellisuutta, jolloin tutkiminen on järkevää.( CNC-STEP: käyttöohje 2016, 30)

Liikeradat, jotka työssä on valittu, ovat työntekijän arvioiden mukaan tehokkaimmat ratkaisut. Niissä ei kuitenkaan ole huomioitu puun lujuusominaisuuksia, laskemalla kullekin liitokselle kestävyyttä. Näin ollen kohdassa 4 TULOSTEN ARVIONTI optimaalisuuden pohdinta perustuu ainoastaan virheiden kautta tulevien menekkien seurantaan sekä työstön helppouteen.

### 3 TUTKIMUSTULOKSET

#### 3.1 Yleistä

Tutkimustulokset osiossa tarkastellaan eri tapoja, joilla jyrinnän voisi suorittaa. Tapauksiksi on valittu kolme seuraavanlaista tapaa:

- Aksiaaliliike vain paarteessa, jossa paarteeseen tulevaan uraan pitää tehdä 3-akselin suuntaista liikettä. Liikkeen aiheuttaa diagonaalinen jyrinä, jossa käytetään vain 2-akselin suuntaista liikettä.
- Aksiaaliliike vain diagonaalissa, jossa diagonaalissa on käytetty 3-akselin suuntaista liikettä, koska paarteeseen tehty ura on jyrinnyt käyttämällä vain 2-akselin suuntaista liikettä
- Aksiaaliliike molemmissa kappaleissa, jossa on haettu sellaista muotoa jolla sormen paksuus pysyisi vahvempana kaikkialla liitoksessa. Tämä vaatii 3-akselin suuntaista jyrinystä molemmissa kappaleissa, sekä diagonaalissa, että paarteessa.

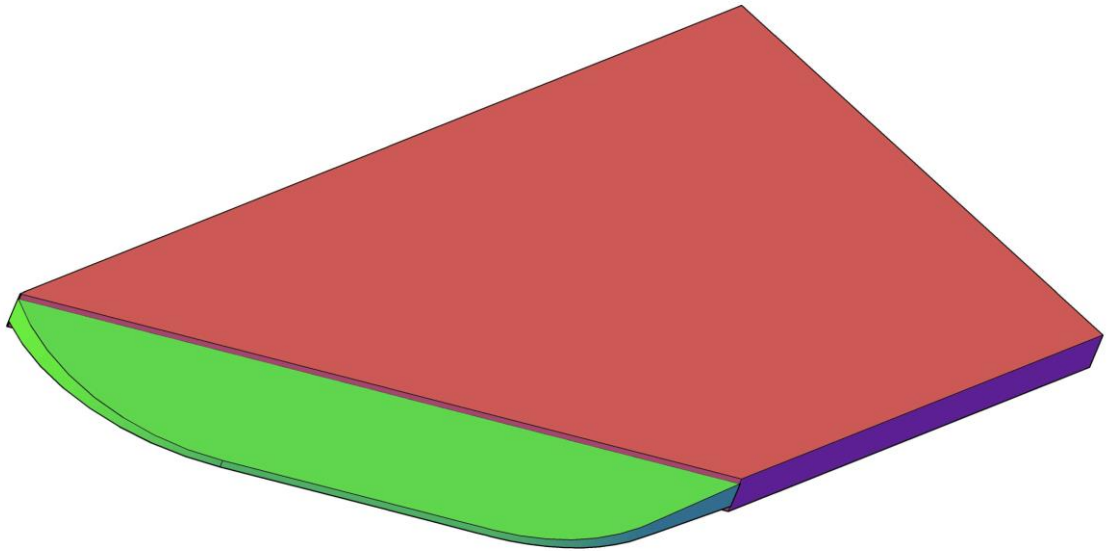
Tapaukset on valinnut TkT Tuomo Poutanen, joka on suunnitellut kyseisen liitoksen ja on kehitystyössään huomannut ko. ongelmat tarpeellisiksi ratkaista.

#### 3.2 Tapaus 1, Aksiaaliliike paarteessa

Ensimmäisessä tapauksessa optimointi suoritetaan paarteen jyrinnälle.

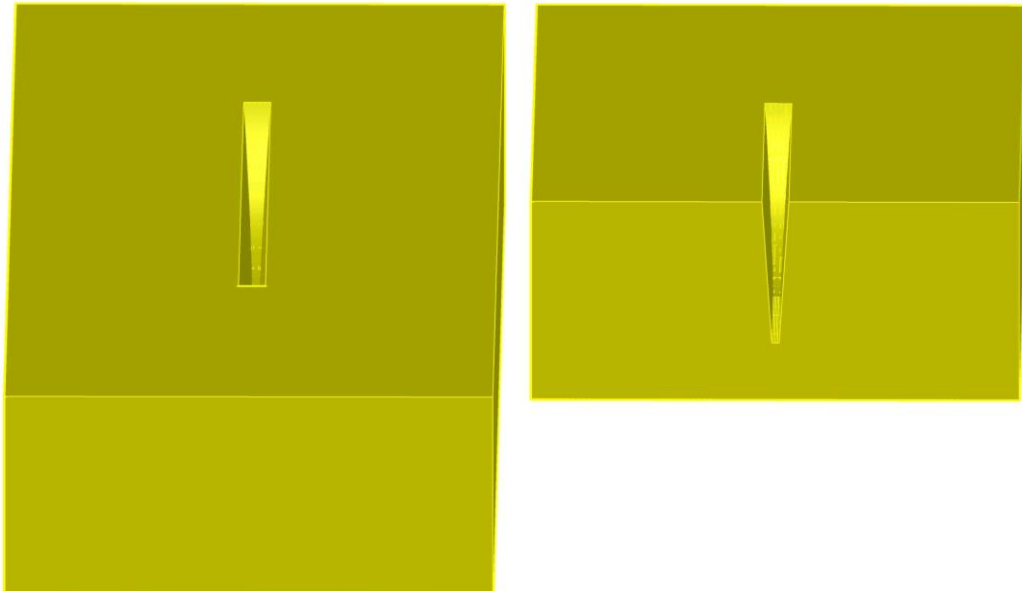
##### 3.2.1 Tapauksen kuvaus

Tässä tavassa diagonaalinen jyrinä suoritetaan niin, että sen molemmat sivut ajetaan erikseen ilman minkäänlaista aksiaaliliikettä. Tällainen jyrinä aiheuttaa sen, että sormen kärjen vahvuus vaihtelee sen mukaan kuinka Y-akselilla sormessa liikutaan. Kurson muodon aiheuttaessa sormessa Y-akselilla ylöspäin tultaessa sormen vahvuuden kasvamista.



KUVA 6. Periaatekuva diagonaalista

Diagonaalin jyrsinän yksinkertaisuuden johdosta pitää paarteessa tulevaan uraan huomioida diagonaalin sormen kärjen vahvuuden vaihtelut. Tämä ongelma ratkaistaan siirtämällä kursoa sen jyrsiessä liitosta kaikissa kolmessa akselissa. Näin ollen on ratkaistu liikerata, jolla pyritään yhdellä jyrsinliikkeellä tuottamaan paarresormi, joka antaa mahdollisimman vähän virhettä.

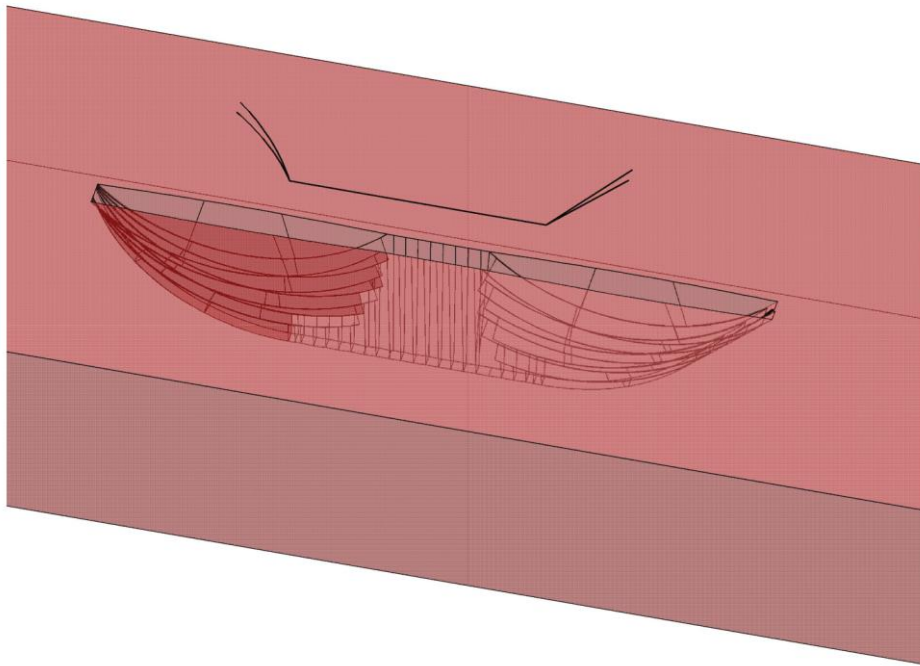


KUVA 7. Periaatekuva paarteesta

### 3.2.2 Tapauksen tulokset

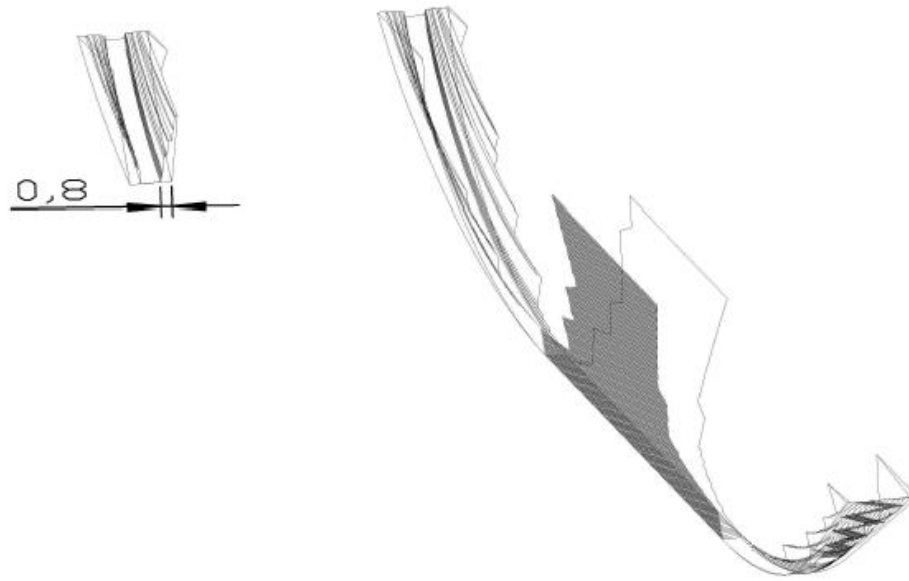
#### Lähtötilanne

Tapauksen aluksi selvitin millaisia virheitä syntyy, kun kurso ohjataan kuvan 8 liikerataa. Siinä kurso liikkuu reunoille levitessään niin, että se läpikäy erikseen molemmat linjat. Näin sain vertailutuloksen, mihin on ylipäättänsä tällä tekniikalla liitoksessa mahdollista päästä. Liikeradassa huomioitiin päässä, joka loppuu kaareen, että kurson pitää liikkua noustessaan ylöspäin urassa myös kaaren suuntaisesti. Tällöin vältetään siltä, ettei kurso syö uraa liian pitkäksi.



KUVA 8. Kurson liikerata lähtötilanteessa

Tämä aiheuttaa kuitenkin tapaukseen suurimmat virheet sillä, kun kursoa nostetaan kaarella ylöspäin se jättää uran pohjaan aina ylimääräistä puuta. Tämä aiheuttaa aivan liitoksen loppussa sen, että diagonaali ja paarsormen pohja ovat päällekkäin jopa 0.8mm per puoli. Muilta osin päällekkäin meneviä osia oli mitättömän vähän. Kuvassa 9 on esiteltynä kyseiset virheet. AutoCAD- ohjelmalla otetuissa virheissä tulee kuvia katsoessa huomioda, että ohjelma jättää kuviin pintoja. Näillä pinnoilla ei kuitenkaan ole vahvuutta, joten todelliset virheet huomaa, kun otetaan leikkaus virhe objektista.



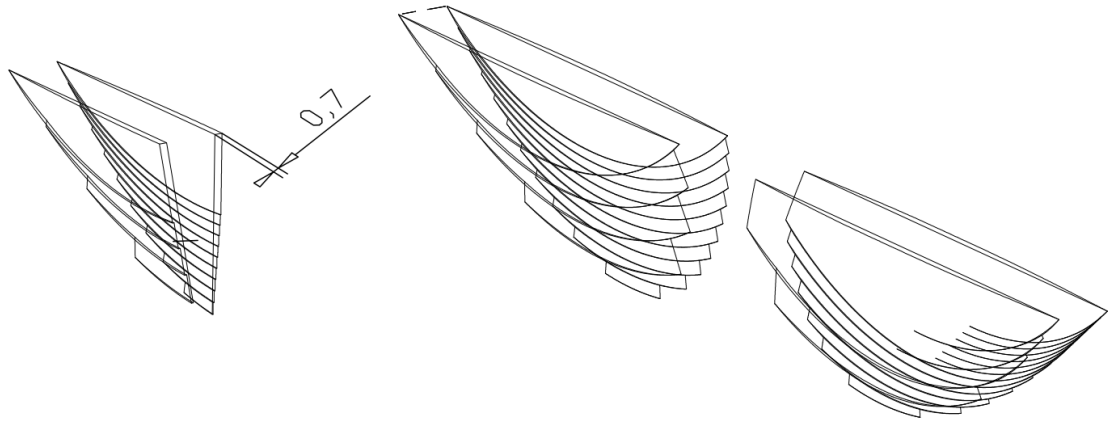
KUVA 9. Jyrsinnän päällekkäiset virheet

Kaaren muotoinen liikerata syntyy, kun tuotetaan paarresormi joka ei ole liian pitkä. Näin ollen kuitenkin kurson keskipisteen liikkuaessa kaarella alaspäin sen pystysuora matka on huomattavasti pidempi kuin se matka jonka kurson reuna tulee oikealla jyrsintälinjalla alaspäin. Tästä syystä kurso jättää paarresormen pohjaan aina hieman virhettä. Kurso liikkuu sisälle päin sen pinnan kaltevuuden mukaan, sitä mukaan mitä kurson keskipisteen pystyakselin arvo muuttuu. Tätä ei voida muuttaa loivemmaksi, joka parantaisi ongelmaa päällekkäisyyksien kanssa, koska kyseinen kulma määrittää samalla sen kuinka paljon liitoksen reunaan jää välyksiä.

Todellisuudessa kuitenkin tämä virhe pienenee, koska ura pitää jyrsiä aina niin, ettei sormi jää kantamaan. Tämä mm. siksi, että liitosta liimattaessa liimalla pitää olla jokin tila mihin se pursuaa liitosta yhteen puristettaessa. Tällöin uran syvennys pienentää uran pohjalle jäävää virhettä huomattavasti.

Liitoksen yläosassa kurson ollessa aina kohtisuorassa jyrsittävää puuta vasten, aiheuttaa se liikeratojen kaventuville osille aina virhettä. Kurson liikkuaessa kohti uran pohjaa se kulkee kolme akselin suuntaisesti. Tällaisessa tapauksessa, kurson tulisi olla aina liikeradan tangentin suuntaisesti, jotta virhe vältetään. Kohdassa 3.5 on kuitenkin selvitetty, ettei se ole mahdollista. Näin ollen kurso jyrsii uraan aina ylimääräistä koloa reunoille. Tässä tapauksessa se on suurimmillaan 0.7mm (kuva 10).



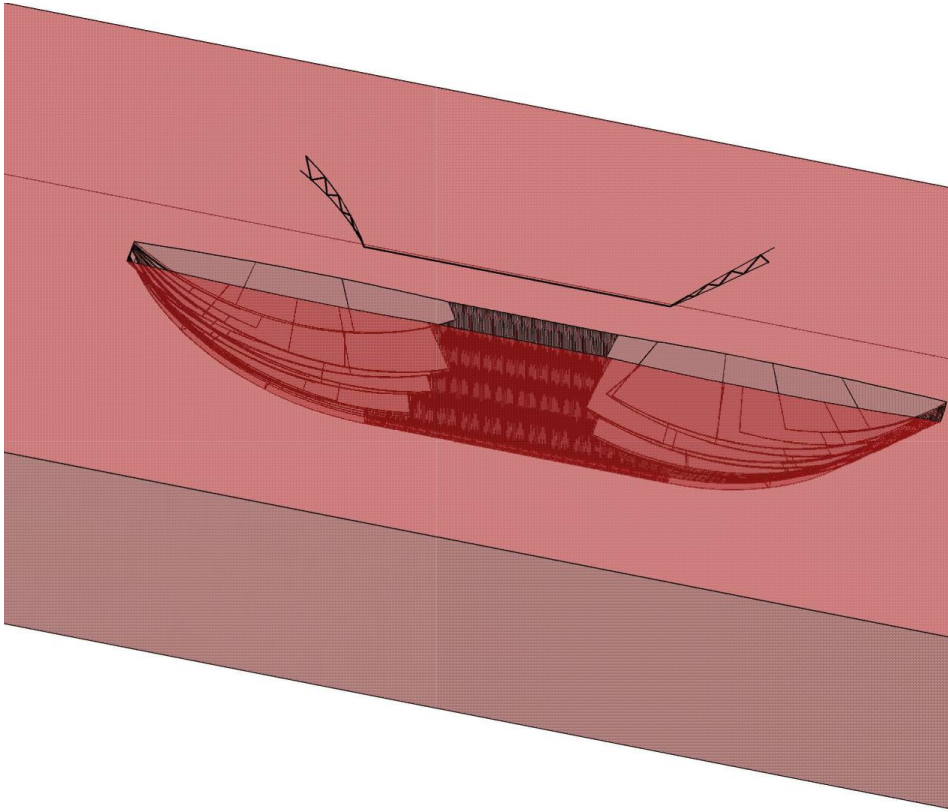


KUVA 10. Jyrsinnän aiheuttamat kolot

Koloja syntyy kuvan 10 osoittamiin paikkoihin. Alueet ovat suurimmillaan 51mm pitkiä ja 22mm syviä, suurin virhe on aina virheen keskellä ylhäällä, josta se lähtee pienenevän tasaisesti reunoille ja alaspäin mentäessä, kurson pinnan mukaisella kaltevuudella. Suurin virhe on syvyydeltään 0,7mm.

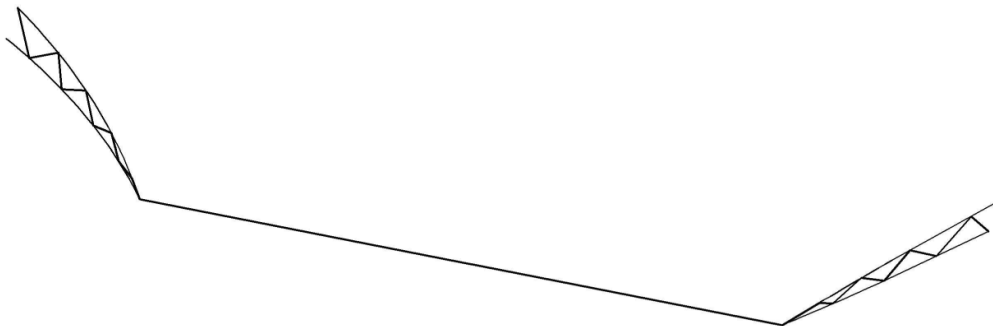
### Liikeradan optimointi

Tavoitteena oli löytää liikerata, jolla paarteeseen saadaan jysittyä yhdellä liikkeellä päästä päähän diagonaalin sormeen sopiva ura. Edellisessä kappaleessa on esiteltynä kurson keskiakselin ääri linjat, joista optimointia on lähdetty suorittamaan. Niiden pohjalta on arvioitu kuinka monta kertaa pitää kurson liikkua reunalta toiselle, jotta urasta tulee riittävän tarkka. Kyseisessä tapauksessa päädyttiin ratkaisuun jossa molemmissa päissä kurso heilahtaa neljä kertaa puolelta toiselle (kuva11).



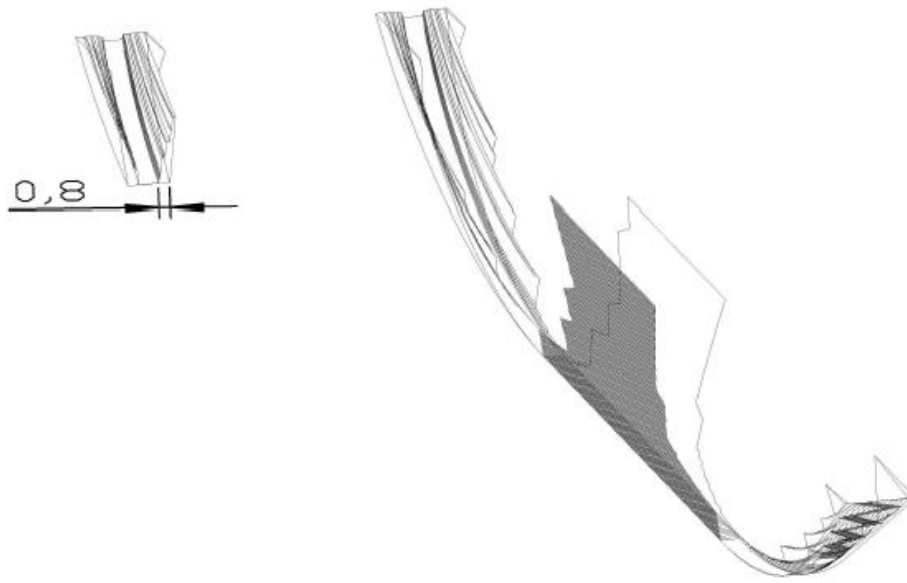
KUVA 11. Kurson keskipisteen liikerata paarteen jyrksinnässä

Lähtötilanteessa kurso jyrski 0.7mm kolon uraan, joten tässä tapauksessa uraa on pienennetty siten, että viimeisen heilautuksen päätepistettä on siirretty 0.2mm kesemmälle. Tämän aiheuttaessa sen vastaavasti liitoksen lopussa sormen kylki ottaa 0.2mm kiinni uran reunaan. Puun ominaisuuksiin kuitenkin kuuluu, että puristettaessa se hieman puristuu kasaan. Kuvassa 12 on esiteltynä liikerata tarkemmin.



KUVA 12. Kurson keskipisteen liikerata

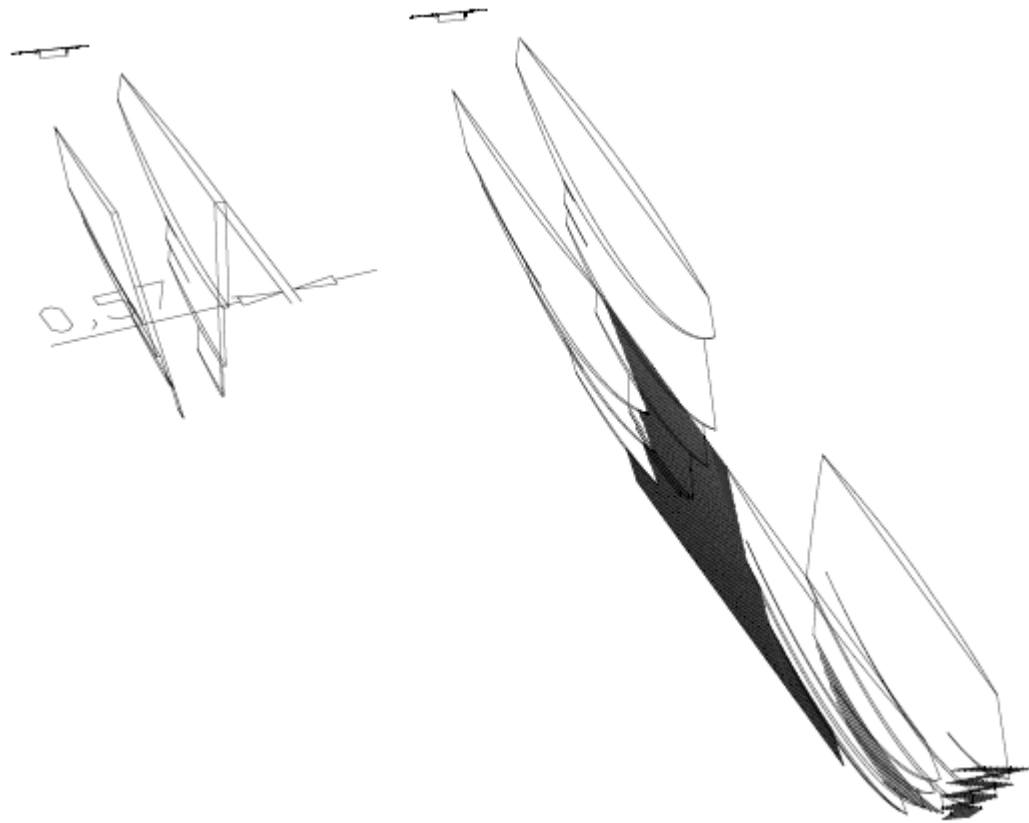
Päädytyllä liikeradalla esiintyy sama virhe kuin lähtötilanteessa, sen ollessa tässä tapauksessa paarisormen pohjaan jää pahimmillaan 0.8mm päällekkäisyyksiä. Päällekkäisyydet alkavat aivan liitoksen reuna-alueelta ollen siellä vahvimmillaan, tässä tapauksessa virhe pienenee nollaan koko aksiaaliliikkeen matkan alueella. Kuitenkin virheen todellinen suuruus tässäkin tapauksessa pienenee, kun ura jyrsitään hieman syvemmäksi. Muilta osin päällekkäin menevät osat pysyvät selkeästi alle 0.5mm (kuva 13).



KUVA 13. Optimoidun jyrsinnän päällekkäiset virheet

Virhettä syntyy koko aksiaaliliikkeen luomalle alueella, se pienenee lähes lineaaristi nollaan tultaessa reunalta keskelle päin.

Pienellä liikkeen leveyden pienennyksellä päästiin tulokseen, jossa kurson aiheuttamat kolot saatiin pienennettyä 0.57mm. Kolo on kuitenkin huomattava, eikä varmastikkaan ole esimerkiksi liimamenekin kannalta hyvä ratkaisu. Kolot ovat suurimmillaan siellä puolella mistä ensimmäinen heilautus lähtee ja minne viimeinen loppuu. Näitä vastakkain olevat virheet ovat täysin samanlaisia, mutta noin 0,1-0,2mm pienempiä. Suurin virhe on pituudeltaan 49mm ja syvyydeltään 22mm, vahvimmillaan se on ylhäällä keskellä 0,57mm ja siitä pienenee kurson pinnan muodostamalla kaltevuudella alueen reunoille.



KUVA 14. Optimoidun jysinnän tuottamat kolot

Diagonaalin jysinnässä ei tässä tapauksessa synny virhettä sillä jysimen liike on suora linja läpi liitoksen. Liitoksessa sormen pohja niiltä aluein, kun liitos on täydessä syvyydessään, on 1,5mm vahva. Kurson dimensioid määräävät, että silloin sormen kanta on koko liitoksen matkalta 5,5mm.

### 3.2.3 Tapauksen yhteenveto

Tapauksessa oli havaittavissa kaksi selkeää ongelmaa. Jyrsinnän ominaisuudet silloin, kun liikutaan paarteen pinnan ja pohjan välisellä siirtymäalueella aiheuttaa sen, että syntyy virhettä sekä päällekkäisyyksien että kolojen suhteen. Päällekkäisyyksiä tapauksessa, jossa molemmat sivut jyrsitään erikseen, syntyy koko aksiaaliliikkeen alueella, ollen vahvimmillaan aivan liitoksen reuna-alueella 0,8mm ja sieltä lähes lineaarisesti vähentyen nollaan aksiaaliliikkeen loppupisteessä. Välejä tapauksessa syntyy maksimissaan 0,7mm

Kolojen pienentämiseksi vaakaliikettä rajoitettiin 0,2mm, tämän vaikutuksena päällekkäisyyksien alue oli laajempi, maksimi arvon pysyessä kuitenkin lähes samana. Samalla vaakaheilautus aiheuttaa sen, että kolot ovat suuremmat aina siellä puolella mistä ensimmäinen heilautus lähtee ja minne viimeinen loppuu. Tämä aiheuttaa n. 0,1-0,2mm erilaiset kolot eripuolille kuvan 14 mukaisesti.

### 3.3 Tapaus 2, Aksiaaliliike diagonaalissa

Toisessa tapauksessa optimointi suoritetaan diagonaalin jyrsinälle.

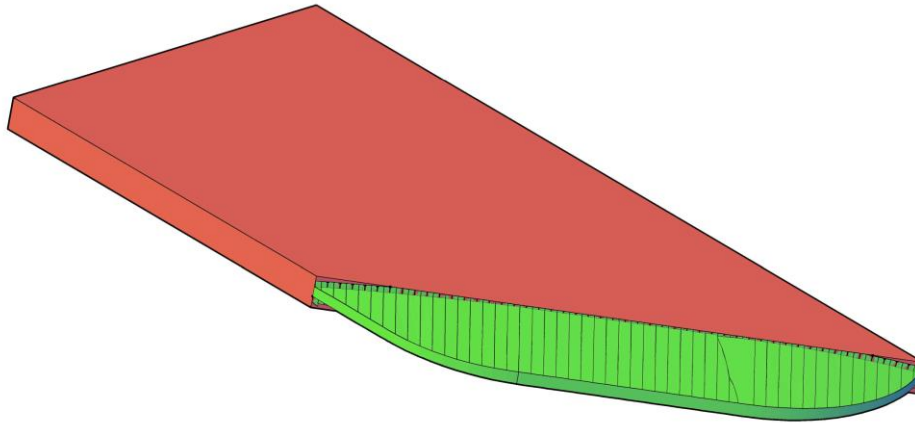
#### 3.3.1 Tapauksen kuvaus

Toisessa tapauksessa suoritetaan jyrsinät päinvastoin kuin ensimmäisessä tapauksessa. Tässä paarteeseen ajettava ura suoritetaan yhdellä liikkeellä, jossa jyrsin liikkuu vain kahden akselin suuntaisesti luoden kuvan x. mukaisen uran. Kurson dimensiosta johtuen on uran pohja joka kohdassa 1,5mm. Tämä aiheuttaa sen, että liitoksen reuna-alueilla puun vahvuus pienenee ja näin ollen ei luo mahdollisesti lujuudeltaan optimaalisinta liitosta.



KUVA 15. Periaatekuva paarteesta

Diagonaalin jyrsinässä pitää huomioida paarteen yksinkertaisesta jyrsinästä aiheutuva sormen pieneneminen aina mentäessä liitoksen reuna-alueille. Tämä ongelma ratkaistaan sillä, että kursoa lähdetään tuomaan liitokseen kuvan x. mukaista liikerataa. Siinä kurso kiertää pisteen 1. ympäri samalla liikkuen z- akselin suuntaisesti pois päin diagonaalista. Reuna-alueen jyrsittyään kurso liikkuu kuvan osoittamaa linjaa aina toiselle reunalle, jossa sen pitää taas kaaren muotoisen liikeradan mukaan kaventaa reuna-alueen sormen kärkeä kohti 1,5mm:ä.

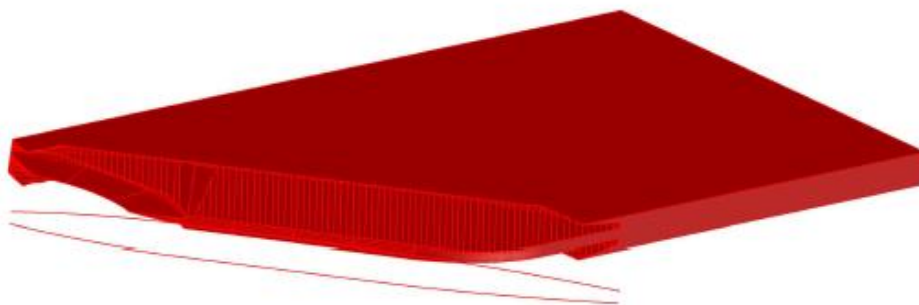


KUVA 16. Periaatekuva diagonaalista

### 3.3.2 Tapauksen tulokset

#### Lähtötilanne

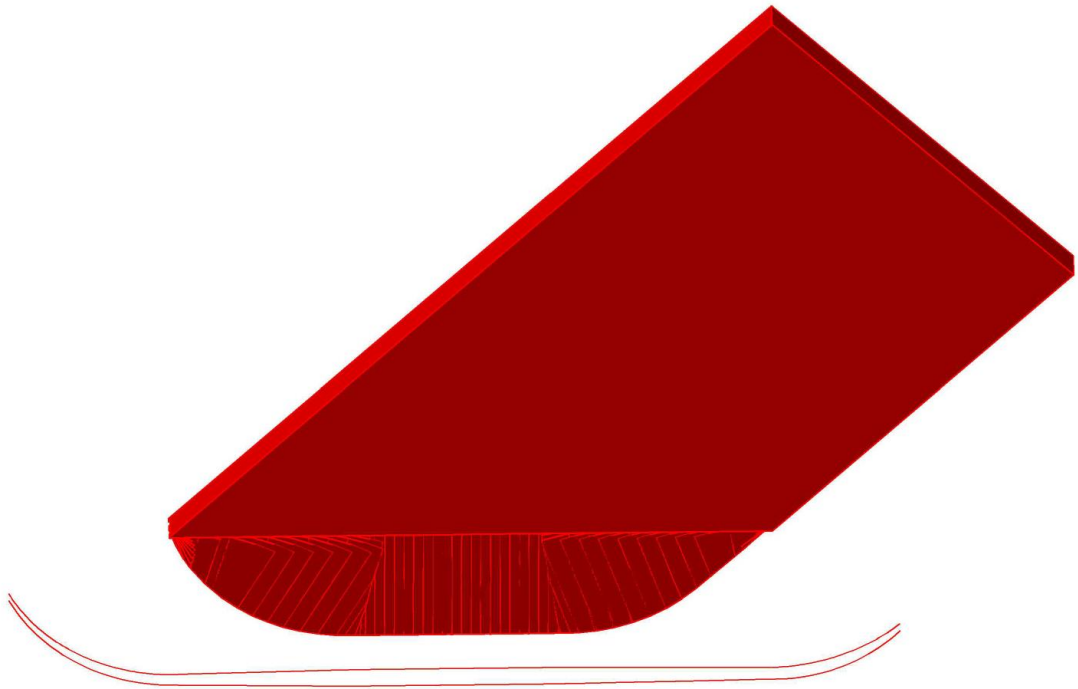
Tapauksen tutkiminen alkoi selvittämällä diagonaalin jysynnässä tarvittava liikerata, jolla saataisiin paras mahdollinen tulos. Liikeradaksi muodostui kuvan 17 kaltainen liikerata, mutta siinä on annettu kurson kääntyä akselinsa ympäri, joka todellisuudessa ei ole mahdollista. Tästä liikeradasta, kun lähdettiin tutkimaan todellista jysyntä tapaa, huomattiin välittömästi kurson jäykän kiinnityksen aiheuttavan suuret virheet liikeradan alussa ja lopussa. Kuvaan on lisätty jäykästi kiinni olevan kurson virhe heti lähtöpisteessä. Kuvasta näkyy hyvin, kuinka kurson luodessa liitoksen alkuun oikean kokoisen sormen, jysii se toisaalta sormen jo kokonaan pois. Kuvassa on esiteltynä virheetön sormi muilta osin kuin lähtöpisteen virheellä, jotta kuvan tulkinta olisi helpompaa.



KUVA 17. Alustava liikerata ja lähtöpisteen virhe

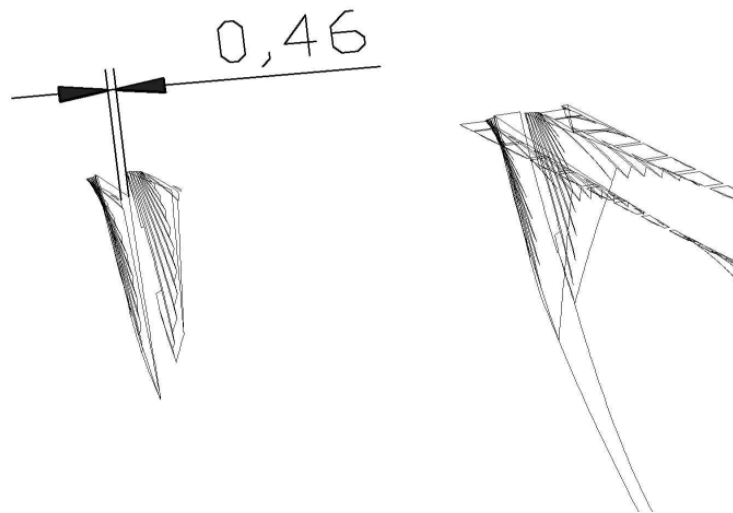
## Liikeradan optimointi

Yllä olevaa liikerataa lähdettiin muokkaamaan sopivaksi virhemarginaaleille. Tulokseksi saatiin kuvan 18 mukainen liikerata. Siinä vasemmalta oikealle luettaessa, alkaa liikerata kaarella joka kulkee kaikkien kolmen akselin suuntaisesti. Tämän kaaren tarkoituksena on välttää virhe, joka syntyy kun kursoa lähdetään lähtötilanteen alku pisteestä liikuttamaan. Ko. virhe on kuvattuna kohdassa lähtötilanne. Liikeradan kaaren muoto taas aiheutuu siitä, kun halutaan pitää sormen kärki ehjänä, joten kurson on kierrettävä kärjen ympärillä. Täysin virheetöntä liikerataa alkuun ei löytynyt, mutta päädytyssä ratkaisussa alussa noin 15mm vaakamatkalla syntyy virhettä maksimissaan 0,46mm. Tämän jälkeen, kun kurso on päässyt täyteen jyrästä syvyyteensä, liikerata kulkee vaakasuoraan. Vaakaan menevällä osuudella alku ja loppu päässä kurson liikerata on hieman levenevä alussa ja lopussa kapeneva. Tällä luodaan loppu osuus reuna-alueen kapenemasta. Näiden liikkeiden myötä syntyy myös hieman lähtötilanteen kaltaista virhettä, mutta syntyvien kolojen virhe on saatu pysymään maksimissaan 0,42mm.



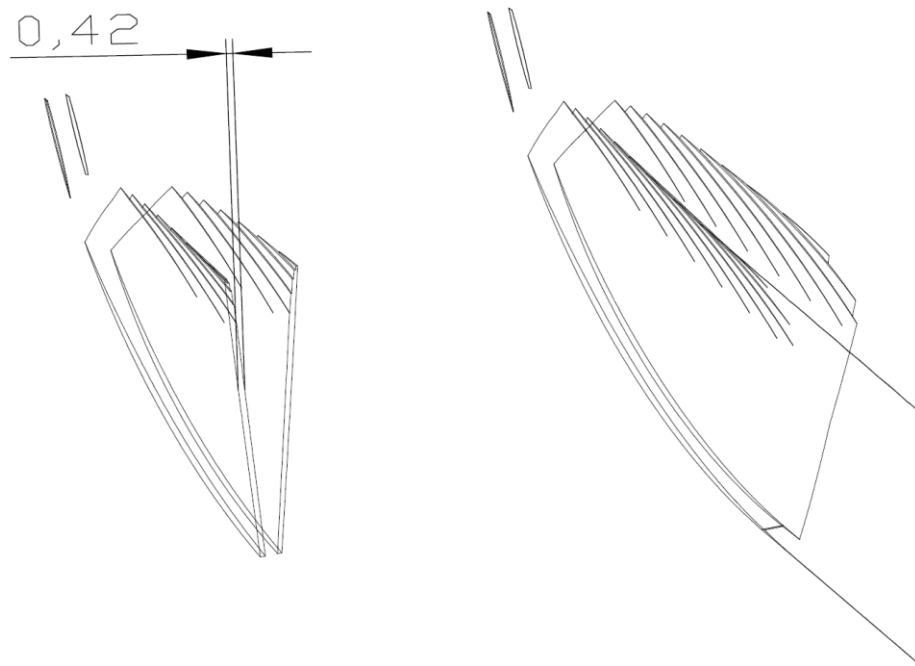
KUVA 18. Kurson keskipisteen optimoitu liikerata





KUVA 19. Optimoidun liikeradan päällekkäiset virheet

Reuna-alueelle 15mm matkalle syntyy virhe, jossa puut menevät päällekkäin maksimissaan 0,46mm. Tätä virhettä saataisiin todennäköisesti pienennettyä ajamalla paarisormen uraa sallittujen virhearvojen puitteissa tahalliseksi ylipitkäksi.



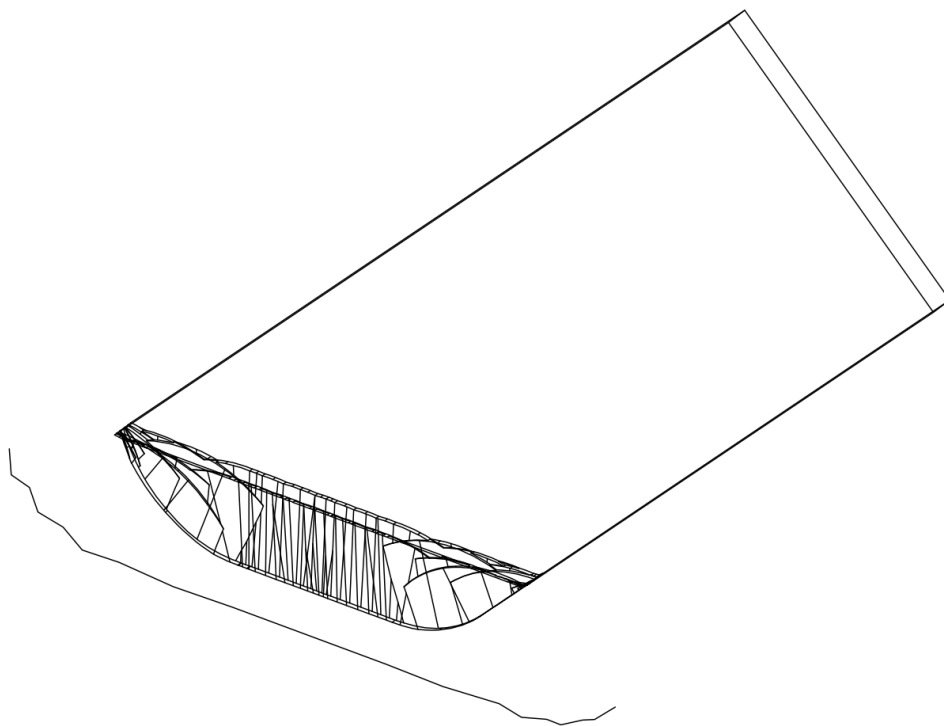
KUVA 20. Optimoidussa jysinnässä jäävät kolot

Koloja jää reuna-alueelle 39mm vaakamatkalla ja pysty suunnassa 28mm alueella maksimissaan 0,42mm. Virhe on suurimmillaan alueen keskellä ja pienenee siitä aina kohti reunoja.

Paarteen jysintä ei aiheuta liikeradallisesti minkäänlaisia virheitä, kyseisessä tapauksessa, kurson liikkua vain kahden akselin suuntaisesti. Parre voidaan siis olettaa, käytännössä kappaleeksi jonka virheet ovat jysimen aiheuttamia. Jysimen virheet ovat esiteltynä kohdassa. 2.4 Tavoitteet ja virhemarginaalit.

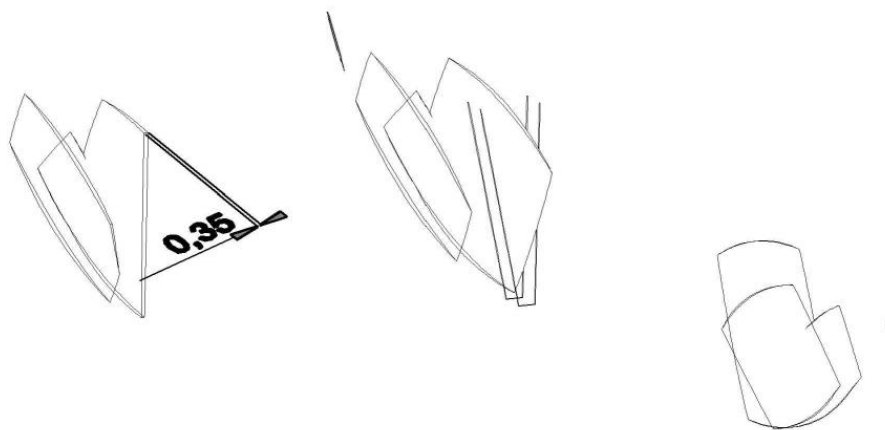
### Aksiaaliheilautukset optimointiin

Optimoinnissa on saatu selville tarvittavan tarkat liikeradat, silloin kun molemmat sivut jysitään erikseen. Näitä liikeratoja käytetään heilautuksien rajapintoina, niin että heilautuksen kääntöpiste on aina jokin piste saadulta liikeradalta. Tapauksessa tutkittiin mallia, jossa kurso heilahtaa neljä kertaa puolelta toiselle molemmissa liitoksen päissä.



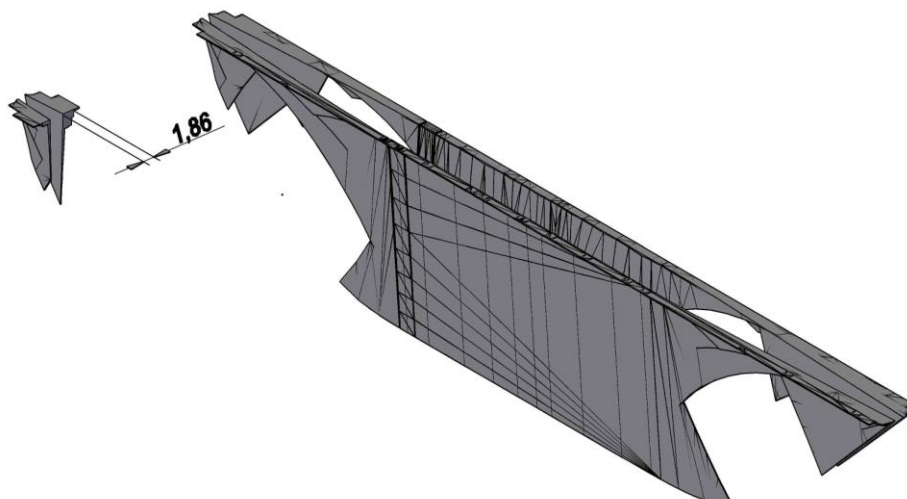
KUVA 21 Kurson keskipisteen liikerata tutkitussa tapauksessa

Liikeraden heilautus aiheuttaa syntyville koloille erilaista virhettä kuin, siinä tapauksessa että molemmat sivut jyrsitään erikseen. Tässä tapauksessa kun liikutaan sama matka liitoksessa vaakasuunnassa aiheuttaa heilautuksen liike eri syvyys liikkeen. Tämä auttaa pienentämään koloja ja niitä syntyykin tässä tapauksessa vain 0,35mm. Virheet syntyvät kuvan 22 mukaisille paikoille ja ovat aina suurempia ensimmäisen ja viimeisen heilautuksen puolella, ollen näillä alueilla 30mm pituisia 15mm syviä ja vahvuudeltaan keskellä vahvimmillaan 0,35mm. Tässäkin tapauksessa virhe pienenee nollaan liikuttaessa keskeltä kohti virheen reunoja.



KUVA 22. Liitokseen jäävät kolot

Päällekkäisyyksien kannalta vaakaliike aiheuttaa hieman lisävirhettä liitokselle. Kurso on optimaalisella jyrshintäalueella tarkasti vain niissä pisteissä, milloin heilahdusliike on kääntöpisteessään. Tämä aiheuttaa hieman ylimääräisen puun jääntiä kuvan 23 osoittamille alueille. Maksimissaan virheet ovat kokoluokaltaan tässä mallissa 0,5mm. Kuitenkin ensimmäiseen ja viimeiseen heilatutukseen tulee suuri virhe, koska heilautus liikkuu suuren matkan syvyysuunnassa reuna-alueella. Virhe poistuu lähes kokonaan kun liikerataan lisätään alkuun yksi heilautus lisää niin, että se liikkuu käytännössä vain syvyysuunnassa ja vain hyvin vähän eteenpäin. Joten todetaan tarvittavaksi heilautuksien määräksi 5 kappaletta per reuna-alue.



KUVA 23. Liitokseen jäävät päällekkäiset virheet

### 3.3.3 Tapauksen yhteenveto

Tapauksessa suurimmaksi ongelmaksi aiheutui selkeästi kurson jäykkä kiinnitys jyrsimeen. Kahteen suuntaan kaarevan sormen tekeminen vaatii kyseisellä metodilla välttämättömiä kompromisseja. Lopputuloksena kuitenkin saatiin tapauksessa, jossa molemmat reunat jyrsittiin erikseen sormi, jossa virheet pysyvät alle 0,5mm. Kuitenkin pienellä noin 15mm alueella tulee kohta jossa puut menevät päällekkäin maksimissaan 0,46mm. Tätä virhettä voidaan todennäköisesti pienentää ajamalla paariesormen uraa virherajojen antamalla suuruudella hieman ylipitkäksi. Käytännön kokeet näyttävät kuinka hyvin puu puristuu kasaan liitosta kokoonpantaessa. Välejä liitoksessa syntyy maksimissaan 0,42mm.

Neljällä aksiaaliheilautuksella molemmissa liitoksen päissä päästiin tulokseen, jossa kolot pienenevät. Kolojen pienentyminen johtui siitä, ettei kurso ollut edellisen tapauksen ääriinjoilla, kuin silloin kun heilutus oli vaihtamassa suuntaa, muuten kurso liikkui välialueella aiheuttaen pienempää virhettä, joka oli maksimissaan 0,35mm. Kuitenkin samasta syystä johtuen päällekkäisyyksiä syntyy enemmän, tällä mallilla näyttäisi virheen kasvavan 0,5mm kuvan 23 mukaisilla alueilla. Aivan reunaan syntyi myös viheen ääriarvo yli 1,8mm, mutta sen poisto onnistuu helposti lisäämällä yksi heilautus aivan liitoksen reunoille, tällöin tarvittavaan tarkkuuteen vaaditaan 5 heilautusta per reuna-alue.

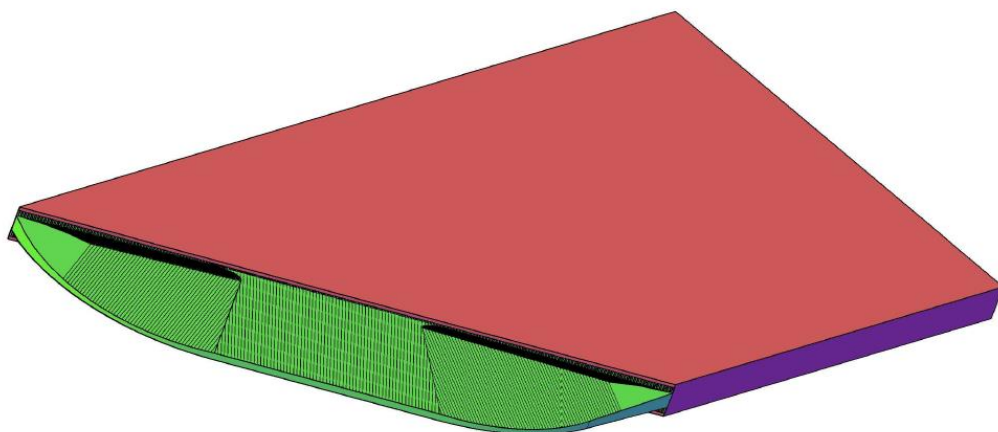
### 3.4 Tapaus 3, Aksiaaliliike paarteessa sekä diagonaalissa

Kolmannessa tapauksessa optimointi suoritetaan sekä diagonaalin että paarteen jyrksinöille.

#### 3.4.1 Tapauksen kuvaus

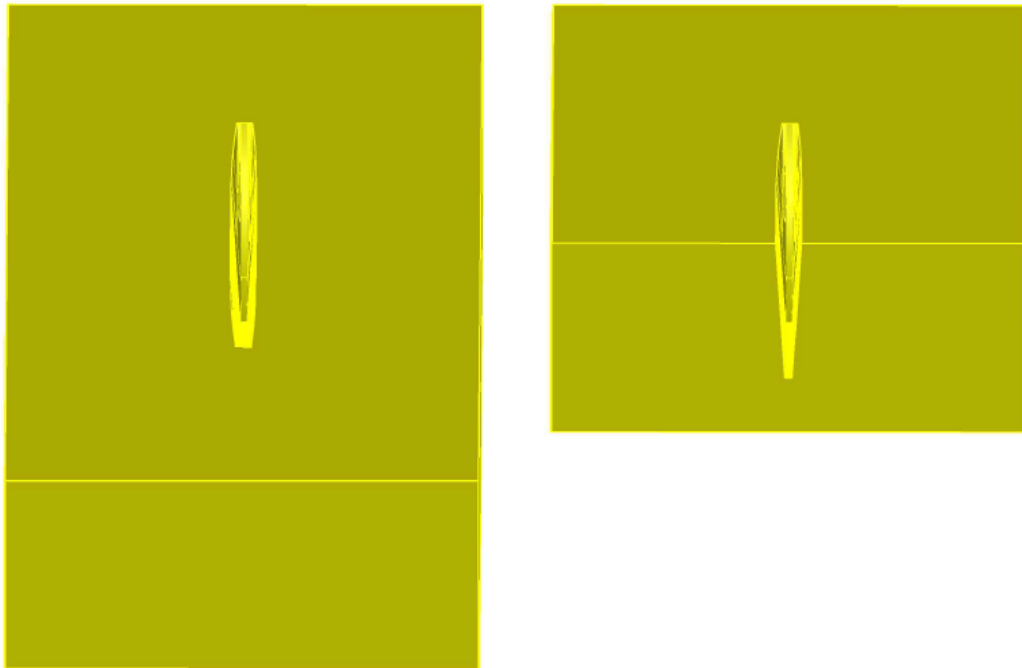
Kolmannessa tapauksessa jyrshintä suoritetaan niin, että pyritään luomaan optimaaliset materiaalivahvuudet koko diagonaalin sormen alueelle. Sormen geometriaa optimoidessa aiheuttaa se myös sen, että paarteen uraan pitää saada kolmen akselin suuntaista liikettä, jotta se pystytään jyrsimään yhdellä vedolla.

Diagonaalin reuna-alueiden vahvuudeksi on määriteltä, että sen tulisi olla 3,5mm. Tähän päästäksemme on liikeradaksi suunniteltu kuvan 26 mukainen rata. Siinä molemmilla reuna-alueilla kurso kulkee kaaren muotoista rataa, näin optimoiden sopivan vahvuuden lisäyksen liitokselle. Sormen keskialueella jyrshintä tapahtuu taas suoraa kuvan mukaista linjaa pitkin, kunnes taas toisen reunan vahvuuden lisäämiseksi pitää liikerata muuttaa kaareksi.



KUVA 24. Periaatekuva diagonaalista

Paarten jysinnässä käytetään samaa ideologiaa kuin tapauksen 1. paarten jysinnässä. Tässä tapauksessa kuitenkin ovat omat tarkat geometriat, jotka pakottavat liikeradan uusiksi suunniteltavaksi. Paarten jysinnän liikerata on kuvattu kuvassa. 27 Siinä kurssolle on annettu yhden jysinnän suorittamiseksi liikerata, jossa sen pitää liikkua kaikkien akseliensa suunnissa.



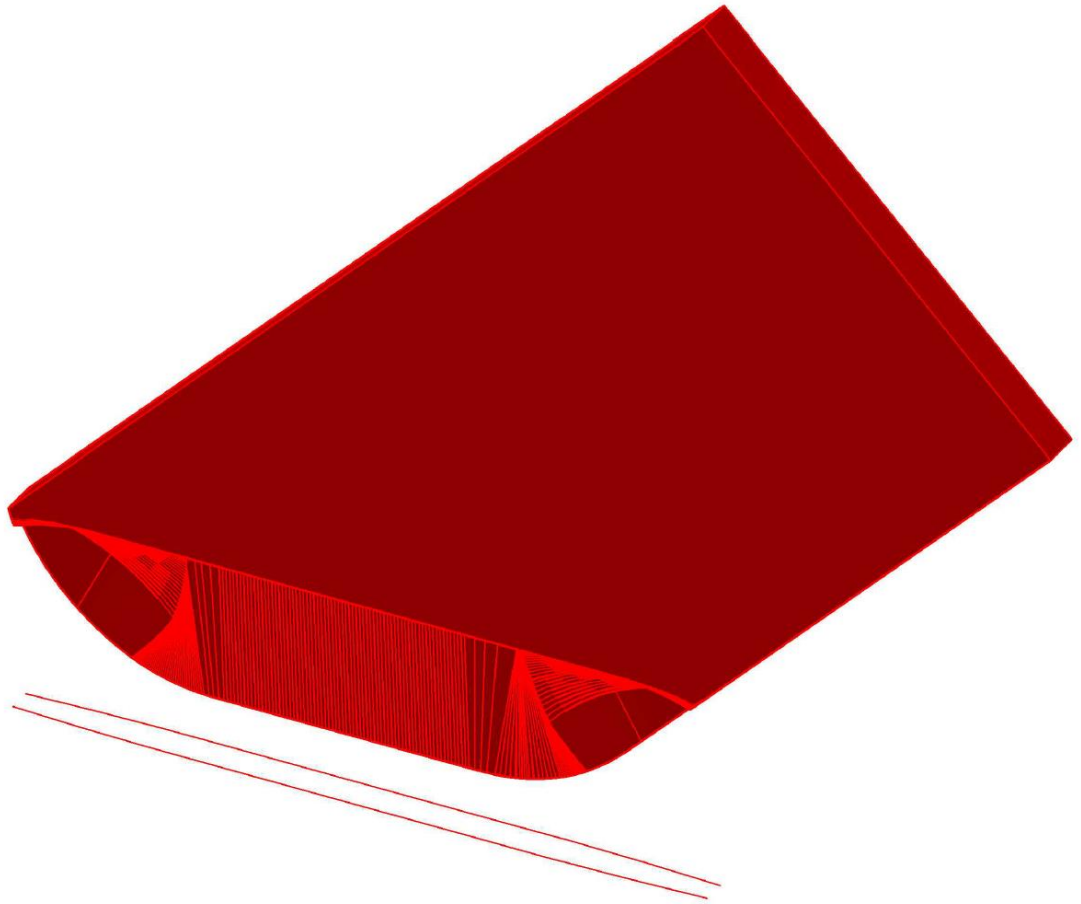
KUVA 25. Periaatekuva paarteesta

### 3.4.2 Tapauksen tulokset

Tapauksen tutkiminen lähti liikkeelle yhdistelemällä tapauksien 1 ja 2 liikeratojen ideologiaa. Tässä tapauksessa pitää suunnitella aksiaaliliike sekä paarteelle että diagonaaliliike. Tapausten 1 ja 2 ratkaisuiden jälkeen, tässä tapauksessa liikeratojen tekeminen oli huomattavasti helpompaa, mutta niiden yhteistoiminnassa piti huomioida uusia asioita.

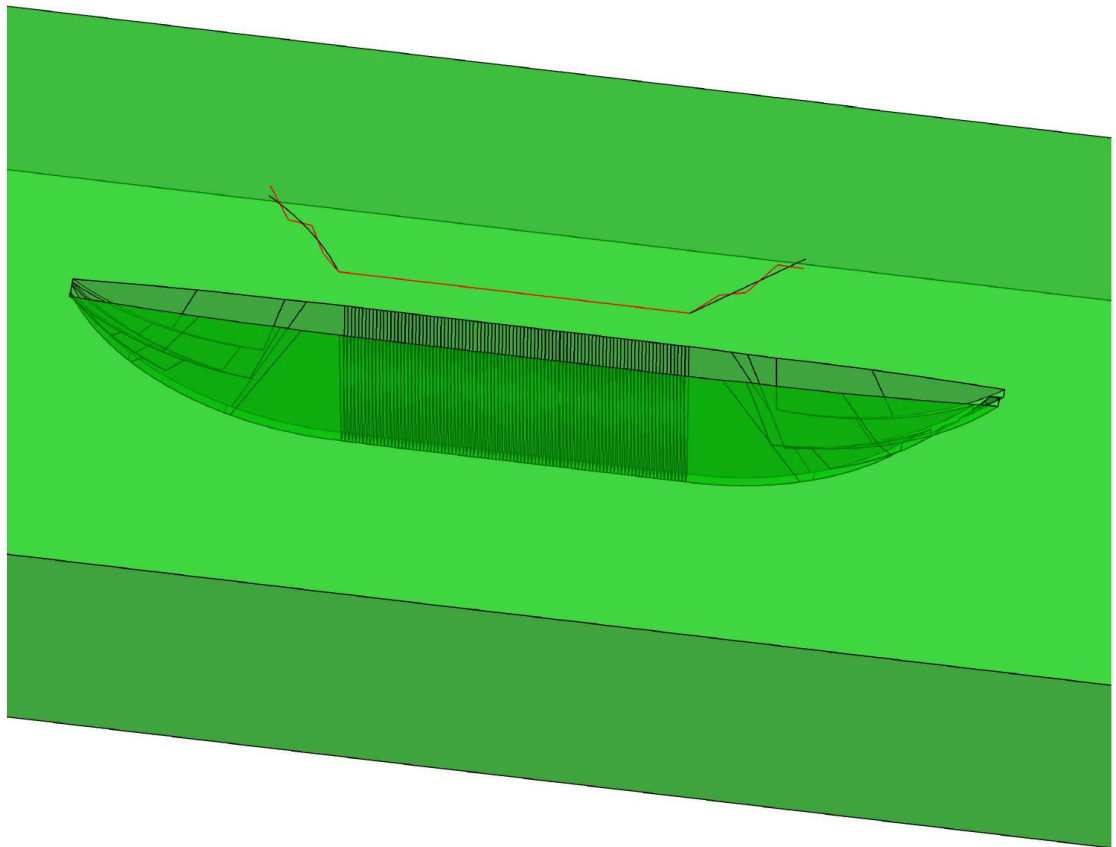
Diagonaalien jysinnässä käytettiin kuvan 26 mukaista liikerataa. Siinä on pystytty käyttämään ratkaisua, jossa kurso liikkuu vain vaaka- ja syvyys akselien suuntaisesti. Sormen leventyessä kohti reuna-alueita poistuu tapauksen kaksi mukainen virhe lähes kokonaan. Liikeradassa vasemmalta oikealle alkaa liike kaarella, joka liikkuu sormen vah-

vuuden muutoksen alueella. Tämän jälkeen tulee suora, joka päättyy taas kaareen, jolla luodaan toisen reunan vahvuuden muutos.



KUVA 26. Diagonaalin optimoitu liikerata

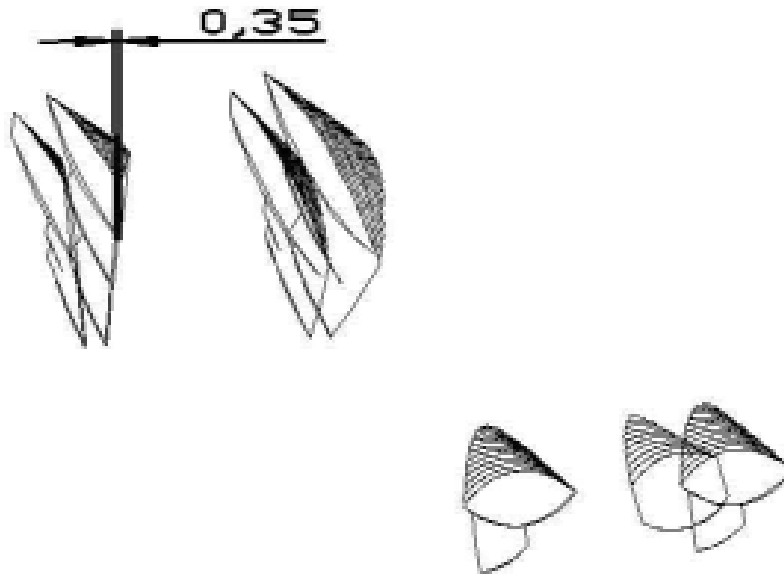
Paarteen jysintä aiheuttaa tässäkin tapauksessa samankaltaisia ongelmia kuin tapauksessa yksi, paarteen pohjaa jäädessä hieman ylimääräistä puuta. Tässä tapauksessa aksiaaliliike on kuitenkin huomattavasti pienempää jolloin virhekin jää pienemmäksi. Kuvassa 27 on esiteltynä tämän tapauksen liikerata.



KUVA 27. Paarteen optimoitu liikerata

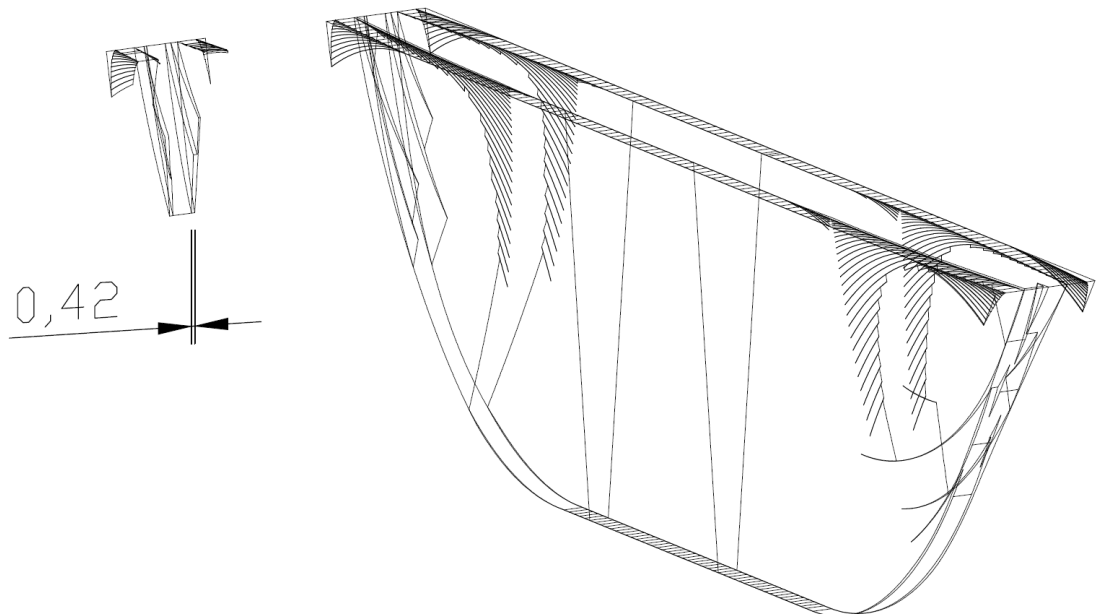
Nämä liikeradat kun yhdistetään, saadaan virheet tapaukselle. Tapauksessa syntyy koloja reuna-alueille, joissa paarteessa on käytetty aksiaaliliikettä. Virhe jää kuitenkin tapauksessa 0,35mm kokoiseksi, jota voidaan pitää onnistuneena annettujen raja-arvojen perusteella. Kuvassa 28 on kuvattuna tapaukseen jäävät kolot.





KUVA 28. Jyrsinnästä aiheutuvat kolot

Päällekkäisiä osuuksia sivuuttiin jo ylemmässä kappaleessa, niiden maksimi arvo löytyy liitoksen reuna-alueelta. Tässä tapauksessa jäätiin virheeseen, joka on 0,42mm, mutta niin kuin tapauksessa 1 perusteltiin todellisuuden virhe jää pienemmäksi uran syvennyksen myötä.



KUVA 29. Jyrsinnästä aiheutuvat päällekkäisyydet

### 3.4.3 Tapauksen yhteenveto

Tapauksessa suoritettiin tapausten 1 ja 2 liikeratojen yhdistelyä. Tapaus tutkittiin niin, että paarteessa esiintyy aksiaaliliikkeenä heilautuksia 2 ja puoli kertaa liitoksen molemmissa päissä ja diagonaalin jysynnässä on käytetty liikeratoja, jotka vaativat molempien sivujen erikseen ajamisen. Diagonaalin aksiaaliheilautukset jätettiin pois tästä tutkinnasta.

Tuloksiksi saatiin, että koloja syntyy 30mm vaakamatkalla ja 18mm pystymatkalla maksimissaan 0,35mm (kuva 28.). Virhe on suurimmillaan virhealueen keskellä ja pienenee liikuttaessa alueen reunoille. Pälletäkäisiä virheitä syntyy samasta syystä kuin tapauksessa yksi aivan liitoksen reuna-alueelle. Virhealueen pituus on 13mm ja siinä maksimissaan virhettä 0,42mm. Tätä virhettä pystyttäisiin todennäköisesti pienentämään ajamalla paarisormea ylipitkäksi, mutta 0,5mm paarisormen pidennyksellä ei virhettä alustavien tutkimusten perusteella saataisi kokonaan poistettua.

### 3.5 Tapaus 4

Tässä tapauksessa on pohdittu täsmälleen samanlaista jysintää kuin kohdassa 3.2 Tapaus 2, aksiaaliliike diagonaalissa. Ideana oli muuttaa diagonaalin jysintää sillä tavoin, että kurson akseli ei olisi koko ajan jäykästi kiinnitettynä kohtisuoraan jysittävää puuta vastaan. Tällä tavoin diagonaalia jysittäessä ei käytännössä syntyisi ollenkaan virhettä, mutta samalla jysintään syntyisi neljäs ulottuvuus, joka loisi tuotantotekniikalle paljon uusia haasteita. Kuitenkin yksi ongelma nousi ratkaisemattomaksi. Sormia jysittäessä ei jysitä vain yhtä sormeaa kerralla vaan kursossa on aina vähintään kaksi tai kolme tettä. Tutkittaessa vain yhtä sormeaa saadaan se virheettömäksi, mutta samassa jysinnässä olevat muut sormet menevät käyttökelvottomiksi.

Tapauksen mukainen sormi on esiteltynä kuvassa 16 ja se on toimiva silloin kun jysinnässä on käytössä vain yksiteräinen kurso, jolla jysitään aina vain yksi sormi kerrallaan. Tämä jysintämalli luo tutkituista tavoista selkeästi virheettömimmän lopputuloksen.

## 4 TULOSTEN ARVIOINTI

### 4.1 Eri jysintapausten vertailu tuotannon kannalta

Eri tapauksia jysittäessä oli tarkoituksena löytää liikeradan lisäksi myös ajatuksia ja pointteja liitoksesta, mitkä voisivat puoltaa jonkin liitoksen eduksi. Liikeradat olivat kaikilla tavoilla uniikkeja, mutta siltikin vaadittavien värähtelykertojen määrä pysyi tapauksesta toiseen melkein samana. Neljään puolelta toiselle liikkeeseen päädyttiin tapauksissa yksi ja kaksi. Kolmannessa tapauksessa heilautuksia määräytyi vain 2,5 kertaa puolelta toiselle. Nopeasti ajateltuna tämä tarkoittaa, että tapaus kolme on tässäkin suhteessa toimivin ja helpoin ratkaisu. Tapauksessa kolme kuitenkin aksiaaliliikettä pitää käyttää molemmissa liitoksen kappaleissa, kun taas muissa tapauksissa toisen kappaleen jysintä on aina pelkistetty todella helpoksi.

Tuotantoteknisten asioiden vertailu on haastavaa, sillä ei ole selvillä tarkalleen millaisella tehtaan kokoonpanolla ristikoita ruvetaan valmistamaan. Kuitenkin on selvää, että tulevaisuudessa kun liitoksen variaatiot on vakiintunut toimivimpiin malleihin, pitää niistä valmistaa käytetylle piirto-ohjelmalle makrot. Suunnittelutyökalujen kehittämisellä saavutetaan, optimointia sekä suunnitteluun, että myöskin tuotantoon. Tuotanto on lähes täysin automatisoitua robottien kanssa työskentelyä. Siellä toimivat suunnittelutyökalut, joissa liitoksen parametrit on helposti muutettavissa, ovat kannattavuuden ehto.

Jysintätapausten kehitystyö näiden liitosten osalta on vasta alkutekijöissä. Saaduilla tuloksilla voidaan aloittaa käytännön kokeet yhden jysintäkerran sormille. Käytännön kokeista saatujen tulosten perusteella on toistettava tämä samainen suunnittelukierros uudestaan. Tehtaan toiminta ja työkalut luovat varmasti tarkennettavaa liitosten liikera-  
toihin. Toisaalta valmista tuotetta ei ole olemassakaan aina pitää olla varaa kehittyä.

## 4.2 Virheiden keskinäinen vertailu

Kaikkien jysintapojen liikeradat muodostuivat paljonkin toisistaan poikkeaviksi, mutta kaikkien tapausten virheitä yhdisti kurson akselin jäykkä kiinnitys. Jäykän kiinnityksen tuoma virhe alueilla, jossa kursolla on aksiaaliliikettä, on väistämätöntä.

Paarteen virheen hallinta on huomattavasti vaikeampaa, koska jysittäessä on kurso aina suurelta alueelta puun sisällä. Diagonaalin jysinnässä sormen alussa ja lopussa voi puuta alkaa jysimään niin, että kurso aloittaa ainoastaan pieneltä pinta-alalta jysimään puuta. Tämä siksi, että diagonaalissa ei ole kursolla vaaraa osua mihinkään sormen ulkopuolella, kun taas paarteella sormi on ura ehjässä puussa. Tämän syyn ansiosta tapauksen kaksi virheet saatiin pienennettyä jonkin verran pienimmiksi kuin tapauksessa yksi, pääajatuksen kuitenkin ollessa samankaltainen molemmissa tapauksissa.

Tapauksessa kolme, jossa aksiaaliliikettä on molemmissa kappaleissa, saadaan jaettua virheen tuottajaa molemmille kappaleille. Paarteessa kurson keskipisteen vaakaliikkeen suuruus pienenee 3mm:stä 2mm:iin, se on prosentuaalisesti suuri liikkeen pienennys ja näkyy myös selkeästi aksiaaliliikkeen aiheuttamassa virheessä. Diagonaalissa vaakaliike pienenee 7mm:stä 5mm:iin. Nämä vaakaliikkeiden pienennykset näkyvät selkeästi virheiden pienemissä, eikä kappaleiden virheet kertaannu kun liitos asennetaan kasaan. Kaikki kohdassa 3 TUTKIMUSTULOKSET esitellyistä virheistä on siis mitattu, valmiista kokoon laitetusta liitoksesta.

Virheitä voitaisiin saada pienennettyä muuttamalla kurson dimensioita ja suunnittelemalla muun muotoiselle kursolle uudet liikeradat. Kuitenkin virheen aiheuttajana on aina kurson jäykkä kiinnitys, jollon mahdollista voisi olla parempiin tuloksiin pienentämällä kurson leikkeen kaltevuutta.

## 5 POHDINTA

Poutasen yleispätevällä liimaliitoksella valmistettujen ristikoiden mahdollisuudet ovat kiistatta laajat. Sen arkkitehtoniset ja rakennetekniset ominaisuudet ovat todistetusti edellä muita kilpailijoitansa. Maailman laajuisesti valtaville markkinoille pääseminen ei siltikään välttämättä ole nopea tie. Rakennusalan uusien tuotteiden läpiajoa hidastavat tiukat standardit ja määräykset, jotka pitää hakea ja saada. Juridiset esteet ovat kuitenkin vain yksiosa-alue, rakentamista leimaa hyvin vahvasti ajatusmalli ”tehdään niin kuin on aina tehty”. Tutuilla jo pitkään käytössä olevilla ratkaisilla rakentaja pystyy minimoimaan rakennusaikaisia riskejä, koska rakentamisen vaiheet ovat tuttuja rakentajille. Uusien innovaatioiden käyttöönotto vaatii halua rakentajalta, mutta yleensä kuitenkin toimivat ratkaisut löytävät tiensä markkinoille jossakin vaiheessa.

Työssä tutkittujen tapausten liikeratojen tutkiminen onnistui pääosiltaan hyvin. Sallituiden raja-arvojen sisälle päästiin kahdessa tapauksessa kolmesta. Todellinen hyöty saaduista tuloksista kuitenkin varmasti realisoituu vasta tulevaisuuden sormimalleissa. Työssä tutkituissa tapauksissa pyrittiin hakemaan ratkaisua ongelmille, jotka toistuvat tapauksissa lähes aina riippumatta sen tarkoista vahvuuksista. Liitoslujuuksien, liitoskulmien ja erilaisten kursojen huomioon otamisen jälkeen pystytään näiden lähtöolettamuksien jälkeen suorittamaan optimointia mahdollisesti painotetusti jollekin jyrksintämälle.

Paarteeseen liitettyä aksiaaliliikkeellä ilmeni virhettä, jota ei pystytty poistamaan halutulla tehokkuudella, vaikka erilaisia jyrksintämälleja tutkittiin. Diagonaalia aksiaaliliikkeellä jyrksittäessä oli huomattavissa reuna-alueella helpompaa kurson käyttöä, koska ei ollut vaaraa, että kurson toinen pää jyrksisi puuta toisaalta. Tällöin kurson kaaria ja liikkeitä pystyttiin muotoilemaan vapaammin. Tämän huomion ja lisäksi pienempien virheiden osalta perustelisin, että niissä tapauksissa, joissa aksiaaliliikettä käytetään vain toisen kappaleen jyrksinnässä, on se helpompi suorittaa diagonaalin jyrksinnässä.

Aksiaaliliikkeen käyttö molemmissa kappaleissa tuottaa prosessin tässä vaiheessa varmasti niin suunnittelussa kuin tuotannossakin enemmän aikaa vieviä vaiheita. Kuitenkin tulevaisuudessa näkisin liitosten vakiintumisen ja sopivien suunnitteluohjelmistojen kehittelyn jälkeen tämän vaihtoehdon olevan lopulta se toimivin ratkaisu niin virheiden, lujuuden kuin menekkienkin kannalta.

## LÄHTEET

Poutanen T. 2016. Glued trusses. Pdf - tiedosto.

Poutanen T. 2016. Joint challenge of timber engineering. Ppt-tiedosto

Poutanen T. 2016. Liimaristikko. Pdf-tiedosto

CNC STEP. 2016. High-Z Standard S-400. Luettu 2.4.2016.  
<https://www.maschinensucher.de/doc/868972.pdf>

CNC STEP. 2016. High-Z Standard. Luettu 2.4.2016. <http://www.cncstepusa.com/high-z-standard>

Hintsala M. 2011. Sormiliitoksen työstömenetelmän kehittäminen. Puutekniikan koulutusohjelma. Keski-pohjanmaan ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Poutanen T. Useita haastatteluja. Maalis- ja huhtikuu 2016. Haastattelija Aro J. Tampere

## **LIITTEET**

### **Liite 1. AutoCAD -mallit**

Liitteenä on toimeksiantajalle toimitettu kaikkien tapausten AutoCAD –mallit, jotka sisältävät paarteen ja diagonaalin suunnittelut ja niistä saatujen virheiden valmiit tulokset jatkotutkimuksia varten.



## Liite 2. 3D-tulostettu malli

Tapauksesta kolme on tuotettu toimeksiantajalle 3D-tulostettu malli, havainnollistamaan liitoksessa esiintyviä piirteitä.